МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 62–524 https://doi.org/10.23947/1992-5980-2018-18-4-414-420

Совершенствование методов контроля процессов коррозии на объектах машиностроения при высоких параметрах водных теплоносителей[*]

В. Н. Щербаков[1]**
[1]Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Improvement of corrosion process control techniques at engineering facilities under high parameters of water coolants [***]

V. N. Shcherbakov[1]**
[1]Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Введение. Цель работы — повышение надёжности методов прогнозирования поведения гидроксида лития в пароводяном тракте на ТЭС и АЭС и оперативного контроля водородного показателя паровых растворов. Разработан метод оперативного контроля на основе кондуктометрических измерений водородного показателя паровых растворов ингибитора коррозии конструкционных материалов гидроксида лития, применяемого на ТЭС и АЭС.
Материалы и методы. Для практической реализации высокотемпературного оперативного контроля водородного показателя паровых растворов использован метод математического моделирования.
Результаты исследования. Разработан метод контроля водородного показателя паровых растворов гидроксида лития, основанный на определении концентрации в паре путём конденсации пара в охлаждаемом кондуктометрическом датчике, размещённом в паровом пространстве парогенератора, что позволило значительно повысить точность определения концентрации гидроксида лития. Предложены уравнения, описывающие изменение предельной молярной эквивалентной электропроводности и констант диссоциации гидроксида лития в широком диапазоне изменения параметров состояния.
*Обсуждение и заключения***.** Предложенные метод оперативного контроля водородного показателя паровых растворов и математические модели для расчёта предельной эквивалентной молярной электропроводности и констант диссоциации обеспечивают приемлемую для практических расчётов погрешность и возможность автоматизации измерений. При увеличении температуры пара до 573,15 K возникает необходимость в увеличении концентрации гидроксида лития в паре до 10^{-2} моль/кг.

Introduction. The work objective is to increase the reliability of the prediction methods for the lithium hydroxide behavior in the steam-water circuit at the thermal power plants and nuclear power plants, and for the operational monitoring of the pH index of steam solutions. A method of operational control is developed on the basis of the conductometric measurements of the hydrogen index of the corrosion inhibitor vapor solutions for construction materials of lithium hydroxide used at the TPP and NPS.
Materials and Methods. A mathematical model method is used for the practical implementation of the high-temperature operational control of the steam solution pH index.
Research Results. A method for monitoring the pH of vapor solutions of lithium hydroxide based on the determination of vapor concentration through the steam condensation in the coolable conductivity sensor located in the vapor space of the steam generator is developed. This has significantly improved the accuracy of determining the lithium hydroxide concentration. Equations describing the change in the limiting molar equivalent conductance and dissociation constants of lithium hydroxide in a wide range of state change parameters are proposed.
Discussion and Conclusions. The proposed on-line technique of testing the pH value of steam solutions, and mathematical models for calculating the limiting molar equivalent conductance and dissociation constants provide an acceptable error level calculations and the capability of measurements automation. With an increase in the vapor temperature up to 573.15 K, the necessity arises to fortify lithium hydroxide in the vapor to 10^{-2} mol / kg.

Ключевые слова: машиностроение, коррозионные процессы, автоматический контроль, паровая фаза, кондуктометрические методы, мониторинг.

Keywords: mechanical engineering, corrosion processes, automatic control, vapor phase, conductometric methods, monitoring.

[*] Работа выполнена в рамках инициативной НИР.
[**] E-mail: vladnik48@aaanet.ru
[***] The research is done within the frame of independent R&D.

Образец для цитирования: Щербаков, В. Н. Совершенствование методов контроля процессов коррозии на объектах машиностроения при высоких параметрах водных теплоносителей / В. Н. Щербаков // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2018. — Т. 18, № 4. — С. 414-420. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2018-18-4-414-420

For citation: V.N. Shcherbakov. Improvement of corrosion process control techniques at engineering facilities under high parameters of water coolants. Vestnik of DSTU, 2018, vol. 18, no. 4, pp. 414-420. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2018-18-4-414-420

Введение. При организации и ведении водно-химических режимов (ВХР) на ТЭС и АЭС одной из главных задач является сведение к минимуму коррозионных повреждений теплосилового оборудования в зоне контакта с водой и паром [1]. Дозирование в питательную воду *LiOH* в необходимых количествах обеспечивает создание на поверхности металла прочной защитной литий-ферритной плёнки, замедляющей коррозию и коррозионное растрескивание теплообменных труб парогенераторов АЭС с ВВЭР–1000 [2, 3], а также значительное увеличение времени наработки оборудования на отказ [3]. При дозировании *LiOH* в питательную воду барабанных котлов ТГ–104 на ТЭС также наблюдается формирование защитной литий-ферритной плёнки [4]. На АЭС *LiOH* применяют в России и за рубежом [4–6]. В перспективных атомных реакторах IV поколения *SCWR* (*supercritical water-cooled reactor*), обеспечивающих увеличение термического КПД по сравнению с существующими (*PWR*) с 33 до 44 %, при давлении *P*=25 *МПа* температуру *T* водяного пара планируют увеличить до 953 *K* [6]. Для создания на ТЭС и АЭС оперативного контроля значений *pH* водных и паровых растворов *LiOH*, определяющих эффективность защиты от коррозии, необходимы данные о предельной эквивалентной электропроводности Λ_o и константах диссоциации K_d *LiOH* при высоких *P* и *T*, представленные в виде, удобном для практических расчётов. Методика расчёта *pH* растворов *LiOH* на основании данных об удельной электропроводности χ, предложенная авторами для жидкой фазы [7], неприемлема для паровой фазы при малых значениях плотности ρ и концентрации *C* в связи с высокой погрешностью определения χ и K_d [8].

Целью настоящей работы является повышение надёжности методов прогнозирования поведения *LiOH* в пароводяном тракте на ТЭС и АЭС и оперативного контроля *pH* паровых растворов.

Для достижения поставленной цели созданы уравнения для расчёта Λ_o и K_d на линии насыщения и в перегретом паре при *T* до 773,15 *K*, а также разработана методика оперативного контроля *pH* паровых растворов *LiOH*.

Материалы и методы. По сравнению с традиционным контролем, связанным с отбором и охлаждением проб, оперативный контроль *pH* при помощи кондуктометрических датчиков, установленных в теплоносителе парогенераторов и работающих при *T* и *P*, близких к рабочим, является более объективным и практически безынерционным [7, 8]. В расчётах *pH* для жидкой фазы в [7] были использованы экспериментальные данные о K_d *LiOH* [8], ионном произведении K_w [9], и диэлектрической проницаемости ε для воды [10]. Определение концентрации *C* водных растворов *LiOH* осуществлялось на основании зависимостей $C\ LiOH=f\ (\chi\ LiOH)_{T=Const}$, полученных на основании экспериментальных данных о χ растворов.

При измерении χ растворов в паровой фазе (особенно при малых ρ и *C*), когда полярные свойства растворителя ослаблены, степень диссоциации *LiOH* мала и сопротивление межэлектродного пространства измерительной ячейки кондуктометрического преобразователя может стать соизмеримым с сопротивлением электрического изолятора, что приведёт к большим погрешностям определения χ [8].

Для практической реализации высокотемпературного оперативного контроля *pH* необходимые данные о Λ_o и K_d могут быть получены в исследуемом диапазоне изменения параметров состояния методом математического моделирования и представлены в виде уравнений.

Результаты исследования. На основании анализа существующих методов в данной работе предложен метод контроля *pH* паровых растворов *LiOH*, основанный на определении *C LiOH* в паре путём конденсации пара в кондуктометрическом датчике с охлаждаемым капилляром [11], размещённом в паровом пространстве парогенератора в потоке теплоносителя. В этом случае *C LiOH* в паре равна *C LiOH* в конденсате пара и может быть определена из зависимостей $C\ LiOH=f\ (\chi\ LiOH)_{T=Const}$, полученных для жидкой фазы [7]. Конденсация пара позволяет значительно повысить точность определения χ и *C* [8]. Вычисления *pH* для парорастворов *LiOH* производились по методике, описанной в [12], с использованием данных [8] о K_d.

С целью оценки эффективности применения *LiOH* для защиты от коррозии в атомных реакторах IV поколения *SCWR* авторами [6] на основании экспериментальных данных о K_d [13–15] выполнен расчёт *pH* водных и паровых растворов *LiOH* при *P*=25 *МПа* в широком диапазоне изменения ρ, *T*, *C* и предложено эмпирическое уравнение для вычисления моляльной константы ассоциации K_a [16] в диапазоне изменения ρ от 50 до 1000 кг/м^3 и *T* от 373 до 873 *K*:

$$log_{10}K_a = a_1 + a_2/\tau + + (a_3 + a_4/\tau)\cdot log_{10}\delta + (a_5 + a_6/\tau)\cdot(log\delta)^2,$$

где $\delta=\rho/\rho_c$; $\tau=T/T_c$; ρ_c, T_c — плотность и температура раствора в критической точке; a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6 — константы.

В перегретом паре с уменьшением ρ и *T* K_d *LiOH* уменьшается, уменьшается и разность между *pH* H_2O *и pH* парорастворов *LiOH*, что снижает эффективность защиты от коррозии элементов конструкций при высоких *P* и *T*. Авторами вычислены значения *pH* парорастворов *LiOH* при *P*=25*Мпа*; *T*=673, 723 и 773 *K* для *C*=10^{-6}, 10^{-5}, 10^{-4}, 10^{-3} и 10^{-2} моль/кг. В расчётах были использованы экспериментальные данные о K_d *LiOH* [8], ионном произведении K_w [9], и диэлектрической проницаемости воды ε [10]. На рис. 1 представлена зависимость *pH* водных и паровых растворов *LiOH* от ρ при *P*=25 *МПа* для *C*=10^{-6}–10^{2}, моль/кг.

В области ρ<330 кг/м^3 авторы [13–15] не выполняли экспериментальные исследования, поэтому на рисунке представлены только результаты расчёта *pH LiOH* с использованием данных о K_d *LiOH*, полученных по уравнению авторов [16].

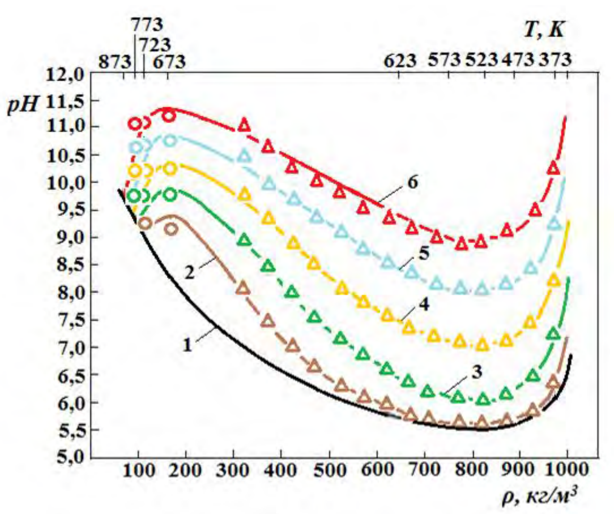


Рис.1. Зависимость *pH* водных и паровых растворов *LiOH* от плотности ρ при *P*=25 *МПа*:
1 — H_2O; 2, 3, 4, 5, 6 — *C LiOH*=10^{-6}, 10^{-5}, 10^{-4}, 10^{-3}, 10^{-2} моль/кг;
Δ,○ — расчёт *pH* по данным о K_d [13–15] и [8];
линии 2, 3, 4, 5, 6 — расчёт *pH* по данным о K_d, полученным из уравнения [16]

Полученные авторами ранее на основании измерений электропроводности высокотемпературных растворов *LiOH*, значения Λ_o и K_d [8], необходимые для создания уравнений, описывающих изменение Λ_o и K_d при изменении ρ и *T*, приведены в таблицах 1 и 2 в сопоставлении с данными других авторов. Для создания уравнений, описывающих поведение Λ_o на линии насыщения, с целью уменьшения погрешности аппроксимации данных диапазон изменения ρ был разбит на 2 части (от 100 до 500 и от 500 до 958 кг/м^3), для каждой из которых предложено уравнение вида:

$$\Lambda_o=b_o\cdot\rho^3 + b_1\cdot\rho^2 + b_2\cdot\rho + b_3,$$

где b_o, b_1, b_2, b_3 — определяемые константы; ρ — плотность раствора, кг/м^3. Значения b_o, b_1, b_2, b_3 для ρ=(100–500) и (500–958) кг/м^3 равны –0,000004; 0,005878; –2,810820; 1942,943226 и –1,25711·10^{-5}; 0,024177411; –16,58559801; 5334,222549 соответственно. Для значений $pK_d=-log_{10}K_d$ вычислены значения коэффициентов d_1–d_6 в уравнении, аналогичном представленному в [16] и приведённому выше:

$$pK_d=d_1 + d_2/\tau + (d_3 + d_4/\tau)\cdot log_{10}\delta + (d_5 + d_6/\tau)\cdot(log\delta)^2,$$

где $\delta=\rho/\rho_c$; $\tau=T/T_c$; ρ_c, T_c — плотность и температура раствора в критической точке; d_1, d_2, d_3, d_4, d_5, d_6 — константы.

При вычислении констант d_1–d_6 были использованы полученные авторами ранее экспериментальные данные о K_d [8]. На линии насыщения авторы учитывали только свои экспериментальные данные. Расчёты для перегретого пара при *T*=673,15 и 773,15 *K* выполнены в двух вариантах: в первом рассматривались только авторские данные о K_d [8], во втором — все данные, приведённые в табл. 2.

Таблица 1

Зависимость предельной молярной электропроводности Λ_o *LiOH* от плотности ρ на линии насыщения и в перегретом паре

ρ, кг/м^3	$\Lambda_o \cdot 10$, См·м^2/кмоль		
	Линия насыщения	*T* = 673 K	*T* = 773 K
100	1710[8]	1675[8]	1665[8]
130	1675[8]	1630[8]	1620[8]
160	1630[8]	1590[8]	1575[8]
200	1575[8]	1550[8]	1545[8]
300	1510[8]	1480[8]	1475[8]
400	1475[8]	1460[8]; 1392[13]	1455[8]
433		1452[15]	
500	1450[8]	1435[8]; 1539[13]	1428[8]; 1574[13]
600	1370[8]	1380[8]; 1355[13]	1388[8]; 1377[13]
621	1277[15] (P = 23,86 МПа)	-	-
700	1265[8]	1275[8]; 1270[13]	1276[13]
714	1189[15] (P = 9,52 МПа)	-	-
800	1100[8]	1088[13]	1109[13]
871	1017[15] (P = 9,91МПа)	-	-
917	780[8]	-	-
922	754[15] (P = 9,4 МПа)	-	-
950	594[13]	-	-
958	573[8]	-	-

Для линии насыщения: d_1=119,50984; d_2=–115,33347; d_3=–174,20233; d_4=167,90533; d_5=–143,78368; d_6=183,09356.

Для первого варианта расчёта для перегретого пара: d_1=7,6323975; d_2=–3,214114; d_3=–10,9289; d_4=2,5463453; d_5=–10,34132; d_6=15,190972; для второго варианта расчёта d_1=10,113404; d_2=–6,133638; d_3=–17,85984; d_4=8,888042; d_5=–8,405401; d_6=14,648395.

Отклонения в % экспериментальных значений Λ_o и pK_d от вычисленных по предложенным уравнениям представлены в табл. 3.

Таблица 2

Зависимость отрицательного логарифма констант диссоциации *LiOH* pK_d от плотности ρ на линии насыщения и в перегретом паре

ρ, кг/м^3	pK_d, моль/кг		
	Линия насыщения	*T* = 673,15 *K*	*T* = 773,15 *K*
100	10,04[8]	10,07[8]; 11,06 [16]	10,16[8]; 13,34[16]
130	8,41[8]	8,56[8]	8,67[8]
160	7,24[8]	7,32[8]	7,69[8]
200	6,25[8]	6,42[8]; 6,45[16]	6,89[8]; 8,16[16]
300	4,40[8]	4,69[8]; 4,13[16]	5,20[8]; 5,64[16]
379		3,48[15]	
400	3,86[8]	3,98[8]; 2,82[16]; 3,14[13]	4,31[8]; 4,01[16]
433		3,1[15]	
500	3,28[8]	3,38[8]; 2,81[13]	3,43[8]; 3,15[13]
600	2,52[8];	2,45[8]; 2,32[13]; 1,26[16]	2,58[8]; 2,43[13]; 1,97[16]
650		2,13[13]	2,25[13]
700	2,08[8];	2,01[8]; 1,83[13]	2,07[13]
712	1,59[17]		
750		1,82[13]	1,89[13]
800		1,63[13]; 0,343[16]	1,65[13]; 0,753[16]
807	1,41[15] (*P* = 11.02 *МПа*)	-	-
922	1,29[15] (*P* = 9,4 *МПа*)	-	-
961	1,03[15] (*P* = 4,88 *МПа*)	-	-

Таблица 3

Отклонение (в %) экспериментальных значений предельной эквивалентной электропроводности ($\delta\Lambda_o$) и отрицательного логарифма моляльных констант диссоциации (δpK_d) от значений, вычисленных по уравнениям

ρ, кг/м^3	$\delta\Lambda_o$	δpK_d				
	Линия насыщения	Линия насыщения	T=673,15 K 1 вариант расчёта	T=773,15 K 1вариант расчёта	T=673,15 K 2 вариант расчёта	T=773,15 K 2 вариант расчёта
100	0,36[8]	0,04[8]	1,20[8]	1,36[8]	3,40[8]; 5,86 [16]	10,9[8]; 15,5[16]
130	0,47[8]	0,23[8]	0,18[8]	1,22[8]	2,42[8]	11,7[8]
160	0,28[8]	0,33[8]	2,62[8]	1,86[8]	3,42 [8]	10,5[8]
200	0,34[8]	0,11[8]	0,92[8]	0,39[8]	0,52[8]; 0,98[16]	5,95[8]; 10,5[16]
300	0,09[8]		2,50[8]	0,29[8]	3,86[8]; 9,17[16]	1,99[8]; 5,96[16]
379					3,05[15]	
400	0,03[8]	0,12[8]	4,99[8]	4,07[8]	14,8[8]; 20,2[16]; 7,96[13]	6,44[8]; 0,56[16];
433					0,41[15]	
500	0,09[8]	0,16[8]	8,95[8]	2,40[8]	21,77[8]; 5,90[13]	8,78[8]; 0,67[13]
600	0,10[8]	0,17[8]	4,56[8]	6,11[8]	13,72[8]; 8,89[13]; 67,8[16]	5,24[8]; 0,60[13]; 24,1[16]
650	-	-	-	-	10,6[13]	4,02[13]
700	0,44[8]	0,05[8]	7,82[8]	-	14,38[8]; 5,95[13]	8,03[13]
750		-	-	-	14,2[13]	11,5[13]
800	0,26[8]	-	-	-	12,8[13]	11,3[13]
917	2,27[8]	-	-	-	-	-
958	1,51[8]	-	-	-	-	-

Обсуждение и заключения. Как очевидно из рис. 1, полученные авторами значения pH $LiOH$ при T=673 K ниже по сравнению с полученными путём расчёта [6] в среднем на 0,2; при T=723 K выше на 0,1–0,2; при T=773 K выше на 0,1–0,7 единиц pH.

Таким образом, величина рассогласования данных о pH $LiOH$ в перегретом паре, полученных авторами и изложенных в [6], возрастает с увеличением T и C. Такое рассогласование можно считать удовлетворительным, если учесть, что с уменьшением ρ до 200–100 кг/м^3 погрешность экспериментальных данных [8] о K_d $LiOH$ возрастает до 180 % и, кроме того, при составлении уравнения авторами [6] не использовались экспериментальные данные о K_d при ρ<330 кг/м^3.

Отклонение экспериментальных значений Λ_o и pK_d от вычисленных по предложенным в настоящей работе уравнениям на линии насыщения не превышает 1 % и только при ρ=917 и ρ=958 кг/м^3 достигает 2,27 и 1,51 % для Λ_o (табл. 3). В перегретом паре при T=673,15 и T=773,15 K для первого варианта расчёта с использованием только авторских экспериментальных данных о K_d [8] наибольшее отклонение экспериментальных дан-

ных pK_d от расчётных не превышает 2,5 % при ρ=100–300 кг/м^3 и возрастает до 8,95 % с увеличением ρ до 400–700 кг/м^3. Для второго варианта расчёта с учётом данных всех авторов, представленных в табл. 2, наибольшая погрешность расчёта по уравнению при ρ=100–300 кг/м^3 и T=673,15 K; T=773,15 K достигает 15,5 % для данных авторов [16], а при ρ=100–300 кг/м^3 и T=673,15 K; T=773,15 K — 67,8 %.

На основании анализа полученных результатов можно сделать вывод о том, что использование $LiOH$ в качестве корректирующей добавки для регулирования pH с целью предотвращения коррозионного разрушения элементов конструкций перспективных атомных реакторов IV поколения *SCVR* не вызывает затруднений при T≤673,15 K и P=25 *МПа*. С ростом температуры уже при T=773,15 K для эффективной защиты от коррозии необходимо увеличивать C $LiOH$ до 10^{-2} моль/кг, что выдвигает задачу исследования растворимости $LiOH$ в паре при этих параметрах состояния.

Предложенные в настоящей работе метод оперативного контроля pH паровых растворов $LiOH$ и математические модели для расчёта Λ_o и K_d обеспечивают возможность определения pH при помощи измерительно-вычислительного комплекса, работающего непрерывно в автоматическом режиме, имеющего малое время запаздывания сигнала и обеспечивающего приемлемую для практических расчётов погрешность результатов измерения. Использование таких устройств в современных системах химико-технологического мониторинга на ТЭС и АЭС позволит значительно повысить надёжность методов прогнозирования поведения $LiOH$ в пароводяном тракте и оперативного контроля pH.

Библиографический список

1. Воронов, В. Н. Водно-химические режимы ТЭС и АЭС / В. Н. Воронов, Т. И. Петрова. — Москва : Издательский дом МЭИ, 2009. — 238 с.

2. Горбатых, В. П. Перспективы использования гидроксида лития в контурах АЭС с ВВЭР / В. П. Горбатых, С. О. Иванов // Вестник Моск. энерг. ин-та. — 2007. — № 1. — С. 14–28.

3. Горбатых, В. П. О возможности применения гидроксида лития на различных этапах жизненного цикла парогенераторов АЭС с ВВЭР / В. П. Горбатых, С. О. Иванов // Вестник Моск. энерг. ин-та. — 2011. — № 2. — С. 10–14.

4. Беляков, И. И. Исследование причин повреждения экранных труб барабанных котлов на литиевом водном режиме / И. И. Беляков, А. Ф. Белоконова, А. В. Михайлова // Электрические станции. — 1980. — № 6. — С. 30–34.

5. Совершенствование водно-химического режима второго контура на Калининской АЭС / С. П. Горбатенко [и др.] // Теплоэнергетика. — 2001. — № 1. — С. 22–28.

6. Carvajal-Ortiz R.A., Plugatyr A., Svishchev I.M. On the pH control at supercritical water-cooled reactor operating conditions // Nuclear Engineering and Design. 2012. — V. 248. — P. 340-342.

7. Shcherbakov V.N., Lukashov Yu.Yu, Lukashov Yu.M. Electrolytical properties of solution of lithium hydroxide at high temperatures and pressures // Thermal Engineering. 2013. — V. 60. No. 4. — P. 280-284.

8. Щербаков, В. Н. Исследование электрофизических свойств водных теплоносителей при высоких параметрах : дис. … канд. техн. наук / В. Н. Щербаков. — Москва, 1980. — 204 с.

9. Bandura A.V., Lvov S.N. The ionization constant of water over wide ranges of temperature and density // Journal of Physical and Chemical Reference Data. 2006. — V. 35. No.1. P. 15-30.

10. Александров, А. А. Теплофизические свойства рабочих веществ теплоэнергетики. / А. А. Александров, К. А. Орлов, В. Ф. Очков. — Москва : Издательский дом МЭИ, 2009. — 225 с.

11. Кондуктометрический датчик : авторское свидетельство 958943 СССР : G01N 27/02 / Д. Л. Тимрот [и др.]. — № 3248961; заявл. 16.02.81; опубл. 15.09.82, Бюл. № 34. — 3 с.

12. Дамаскин, Б. Б. Электрохимия / Б. Б. Дамаскин, О. А. Петрий, Г. А. Цирлина. — Москва : Химия, 2006. — 672 с.

13. Ho P.C., Palmer D.A. Determination of ion association in dilute aqueous lithium chloride and lithium hydroxide solutions to 600C and 300 MPa by electrical conductance measurements // Journal of Chemical and Engineering Data. 1998. — V. 43. No.2. P. 162-170.

14. Ho P.C., Bianchi H., Palmer D.A., Wood R.H. Conductivity of dilute aqueous electrolyte solutions at high temperatures and pressures using a flow cell // Journal of Solution Chemistry 2000. — V. 29. No.2. P. 217-235.

15. Ho P.C., Palmer D.A., Wood R.H. Conductivity measurements of dilute aqueous LiOH, NaOH and KOH solutions to high temperatures and pressures using a flow-through cell // Journal of Physical Chemistry B. 2000. — V. 104. No.50. P. 12084-12089.

16. Plugatyr A., Carvajal-Ortiz R.A., Svishchev I.M. Ion-pair association constant for LiOH in supercritical water // Journal of Chemical and Engineering Data. — V. 56. No.9. P. 3637-3642.

17. Взаимосвязь между коэффициентами распределения примесей котловой воды и константами диссоциации / Г. В. Василенко [и др.] // Теплоэнергетика. — 1995. — № 7. — С. 64–67.

Поступила в редакцию 16.05.2018
Сдана в редакцию 17.05.2018
Запланирована в номер 24.08.2018

Received 16.05.2018
Submitted 17.05.2018
Scheduled in the issue 24.08.2018

Об авторе

Щербаков Владимир Николаевич,
доцент кафедры «Гидравлика, гидропневмоавтоматика и тепловые процессы» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1),
кандидат технических наук, доцент,
ORCID: http://orcid.org/10000-0001-5682-3792
vladnik48@aaanet.ru

Author:

Shcherbakov, Vladimir N.,
associate professor of the Hydraulics, Hydraulic and Pneumatic Control Systems and Heat Processes Department, Don State Technical University
(1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344000, RF),
Cand.Sci. (Eng.), associate professor,
ORCID: http://orcid.org/10000-0001-5682-3792
vladnik48@aaanet.ru